

Early detection system for LPG leaks in tanker vehicles using the MQ-5 sensor

0009-0006-6601-0270¹; 0009-0002-2721-0756²; 0000-0003-4847-0215³; 0000-0003-0310-4123⁴

Eduardo Alfonso Anci García¹; Diana Karolina Rosas Huertas²; Jorge Polanco-Argüelles³; Giancarlo Franko Sanchez Chavez⁴

¹⁻⁴ Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú

U21217951@utp.edu.pe, U21200137@utp.edu.pe, jpolanco@utp.edu.pe, C17401@utp.edu.pe

Abstract– Liquefied petroleum gas transportation in tank trucks represents a critical risk due to leaks that can cause explosions, such as the Villa El Salvador accident (2020) with 34 fatalities. This study developed and experimentally validated an early detection system based on the MQ-5 sensor and Arduino Uno microcontroller. A total of 120 trials were conducted at four distances (1, 5, 10, 15 cm) with 30 repetitions each, establishing a threshold of 400 ADC units. Results showed response times between 0.98 and 3.37 seconds, lower than the 10-second standard. The system achieved 92.50% accuracy with perfect 100% precision (zero false alarms) and 91% sensitivity. Analysis of variance confirmed that distance significantly affects response time ($F=557.03$, $p<0.000001$), establishing a predictive model ($R^2=0.9985$): $\text{Time} = 0.171 \times \text{Distance} + 0.629$. Energy consumption ($<250 \text{ mW}$) and low cost ($\sim \40 USD) confirm its viability for vehicular applications, providing the first scientific quantification of the distance-time relationship for MQ-5 sensors.

Keywords-- LPG leak detection, MQ-5 sensor, Arduino Uno, vehicular safety, response time, statistical analysis..

Sistema de detección temprana de fugas de GLP para vehículos cisterna utilizando el sensor MQ-5

0009-0006-6601-0270¹; 0009-0002-2721-0756²; 0000-0003-4847-0215³; 0000-0003-0310-4123⁴

Eduardo Alfonso Anci García¹; Diana Karolina Rosas Huertas²; Jorge Polanco-Argüelles³; Giancarlo Franko Sanchez Chavez⁴

¹⁻⁴ Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú

U21217951@utp.edu.pe, U21200137@utp.edu.pe, jpolanco@utp.edu.pe, C17401@utp.edu.pe

Abstract— *Liquefied petroleum gas transportation in tank trucks represents a critical risk due to leaks that can cause explosions, such as the Villa El Salvador accident (2020) with 34 fatalities. This study developed and experimentally validated an early detection system based on the MQ-5 sensor and Arduino Uno microcontroller. A total of 120 trials were conducted at four distances (1, 5, 10, 15 cm) with 30 repetitions each, establishing a threshold of 400 ADC units. Results showed response times between 0.98 and 3.37 seconds, lower than the 10-second standard. The system achieved 92.50% accuracy with perfect 100% precision (zero false alarms) and 91% sensitivity. Analysis of variance confirmed that distance significantly affects response time ($F=557.03$, $p<0.000001$), establishing a predictive model ($R^2=0.9985$): $\text{Time} = 0.171 \times \text{Distance} + 0.629$. Energy consumption (<250 mW) and low cost ($\sim \$40$ USD) confirm its viability for vehicular applications, providing the first scientific quantification of the distance-time relationship for MQ-5 sensors.*

Keywords— *LPG leak detection, MQ-5 sensor, Arduino Uno, vehicular safety, response time, statistical analysis.*

Resumen— *El transporte de gas licuado de petróleo en vehículos cisterna representa un riesgo crítico debido a fugas que pueden causar explosiones, como el accidente de Villa El Salvador (2020) con 34 fallecidos. Este estudio desarrolló y validó experimentalmente un sistema de detección temprana basado en el sensor MQ-5 y microcontrolador Arduino Uno. Se realizaron 120 ensayos en cuatro distancias (1, 5, 10, 15 cm) con 30 repeticiones cada una, estableciendo un umbral de 400 unidades ADC. Los resultados mostraron tiempos de respuesta entre 0.98 y 3.37 segundos, inferiores al estándar de 10 segundos. El sistema alcanzó exactitud del 92.50% con precisión perfecta del 100% (cero falsas alarmas) y sensibilidad del 91%. El análisis de varianza confirmó que la distancia afecta significativamente el tiempo de respuesta ($F=557.03$, $p<0.000001$), estableciendo un modelo predictivo ($R^2=0.9985$): $\text{Tiempo} = 0.171 \times \text{Distancia} + 0.629$. El consumo energético (<250 mW) y bajo costo ($\sim \$40$ USD) confirman su viabilidad para aplicaciones vehiculares, aportando la primera cuantificación científica de la relación distancia-tiempo para sensores MQ-5.*

Palabras clave— *detección de fugas de GLP, sensor MQ-5, Arduino Uno, seguridad vehicular, tiempo de respuesta, análisis estadístico.*

I. INTRODUCCIÓN

El transporte de gas licuado de petróleo (GLP) en cisternas representa un riesgo crítico debido a su alta inflamabilidad y a la acumulación de sus vapores en espacios cerrados. La World LPG Association reporta más de mil millones de usuarios de GLP globalmente y 27 millones de vehículos GLP registrados [1]. Si bien este combustible constituye una alternativa energética indispensable, su creciente uso ha incrementado los

incidentes asociados a fugas, incendios y explosiones, convirtiendo su transporte en cisternas en una amenaza crítica para áreas urbanas densamente pobladas [2], [3].

Estudios recientes evidencian la magnitud del riesgo. Munahar [4] documentó que una fuga por corrosión en un tanque de 50 toneladas alcanzó una consecuencia de falla (CoF) de 2381.29 m², clasificándose en la categoría E de API 581. Más crítico aún, Ni Kai y Ma Yuepeng [5] simularon el accidente de una cisterna con 30,000 litros en Italia (2018), donde la onda expansiva alcanzó 0.26 MPa en 2.5 segundos, liberando todo el gas en menos de 6 segundos. Estos casos demuestran que la ausencia de sistemas de monitoreo confiables agrava los riesgos urbanos e industriales con consecuencias humanas, económicas y ambientales.

En Perú, esta problemática se intensifica por la alta dependencia del GLP. El MINEM [6] indica que más del 80% de los hogares peruanos utilizan GLP como fuente energética principal. OSINERGMIN [7] reporta que el 42% de los incidentes por GLP están relacionados con transporte, principalmente por fugas no detectadas. El impacto social se evidenció dramáticamente en Villa El Salvador (2020), donde la explosión de una cisterna dejó 34 fallecidos, más de 60 heridos y 20 viviendas destruidas. Actualmente, 7 millones de hogares dependen del GLP y 650,000 vehículos (20% de la flota nacional) funcionan con este combustible [1]. En ciudades como Arequipa, donde las cisternas circulan cerca de zonas densamente habitadas, la falta de detección temprana incrementa la vulnerabilidad urbana [8].

Diversos investigadores han propuesto soluciones tecnológicas de bajo costo. Morales-Caporal [9] desarrolló un sistema IoT usando el sensor MQ-5 y Arduino Uno para medir niveles de GLP en tanques estacionarios. El MQ-5 detecta concentraciones entre 200-10,000 ppm con tiempos de respuesta menores a 10 segundos, mientras Arduino facilita la programación y activación de alertas automáticas [10]. Sharma et al. [11] demostraron experimentalmente que sistemas basados en sensores MQ y módulos GSM alcanzan efectividad superior al 97% en detección de gases inflamables. Hidayat [12] y El Barkani [13] reportan costos de implementación entre 30-40 USD, contrastando con las pérdidas millonarias de accidentes como el de Bolonia (Italia, 2018), que superaron 20 millones de euros.

Hussein et al. [14] propusieron sistemas IoT de bajo costo y Mishra et al. [15] emplearon aprendizaje profundo para identificar gases con 96% de confiabilidad. Los sensores MQ, particularmente el MQ-5, destacan por su sensibilidad al GLP y fácil integración con tecnologías IoT y GSM [14], [16], [17].

Investigaciones recientes de Márquez-Sánchez [18] y El Barkani et al. [13] confirmaron su adaptabilidad en redes inalámbricas y drones. Avances en inteligencia artificial por Lalithadevi y Krishnaveni [19] demostraron que integrando sensores MQ con algoritmos predictivos se alcanza 98.67% de precisión en clasificación de gases.

Esta investigación responde a la pregunta: ¿cómo detectar de manera temprana fugas de GLP en vehículos cisterna mediante el sensor MQ-5 y Arduino Uno en Arequipa, 2025? La hipótesis plantea que esta integración permite detectar fugas con confiabilidad cercana al 97%, previniendo incidentes graves en contextos urbanos e industriales.

El objetivo general consiste en proponer la implementación de un sistema de detección temprana de fugas de GLP en cisternas mediante el sensor MQ-5 y Arduino Uno en Arequipa, 2025. Los objetivos específicos son: revisar las especificaciones técnicas de ambos dispositivos, simular el funcionamiento del sistema en Autodesk TinkerCAD y recrear su operación en un modelo físico para validar su ensamblaje.

La pertinencia técnica se basa en la capacidad del MQ-5 para identificar concentraciones de GLP entre 200-10,000 ppm con tiempo de respuesta inferior a 10 segundos [9]. Su sensibilidad a propano y butano lo hace adecuado para prevención de riesgos en ambientes móviles [20]. Arduino Uno permite procesar señales rápidamente y activar alarmas con latencia mínima [15]. Sharma et al. [11] validaron un sistema similar con efectividad superior al 97% en pruebas simuladas.

El aporte es tridimensional. Económicamente, el sistema cuesta S/989.66 (30-40 USD el sistema básico [12]), contrasting con pérdidas multimillonarias como las de Bolonia (2018), que superaron 20 millones de euros [13]. Socialmente, protege conductores, trabajadores y población general, considerando que más del 80% de hogares peruanos dependen del GLP [6]. Como resalta Morales-Caporal [9], los sistemas de alerta temprana son esenciales donde una fuga no detectada puede convertirse en evento fatal en minutos. Técnicamente, la integración MQ-5 y Arduino Uno ha demostrado sensibilidad y eficacia en múltiples investigaciones [9], [11], [12]. Legalmente, la propuesta se enmarca en el Decreto Supremo N.º 27-94-EM, que regula la seguridad en transporte de GLP, y en la Ley N.º 29783, que establece obligación de implementar medidas preventivas de seguridad laboral.

Este estudio propone un sistema autónomo de detección temprana de fugas de GLP que representa una alternativa económica, técnicamente viable y legalmente respaldada. Su implementación busca reducir riesgos asociados al transporte de GLP en zonas urbanas, contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad y salud ocupacional en Perú mediante un sistema accesible, confiable y adaptado a condiciones locales.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño del estudio de investigación

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo de diseño experimental con alcance descriptivo-correlacional. Se realizó una validación progresiva en tres fases: (1) análisis

técnico de componentes, (2) simulación virtual en Autodesk TinkerCAD, y (3) experimentación controlada con prototipo físico. El estudio buscó caracterizar el desempeño del sistema sensor MQ-5 + Arduino Uno midiendo tiempos de respuesta, exactitud de detección y relación distancia-sensibilidad en condiciones de laboratorio controladas.

B. Unidades de estudio y configuración experimental

El sistema bajo estudio integró dos componentes principales: sensor MQ-5 (Winsen Electronics) y microcontrolador Arduino Uno R3 (Atmel ATmega328P). El sensor MQ-5 fue seleccionado por su rango de detección específico para GLP (200-10,000 ppm), tiempo de respuesta inferior a 10 segundos y operación a 5V compatible con el Arduino [9] [12] [21]. El Arduino Uno proporciona 6 entradas analógicas de 10 bits (resolución 0-1023 unidades) para digitalizar la señal del sensor, 14 pines digitales para controlar periféricos de alerta, y memoria suficiente (32 KB flash) para algoritmos de procesamiento en tiempo real [23] [27].

La variable independiente fue la distancia entre la fuente de gas y el sensor, establecida en cuatro niveles: 1 cm, 5 cm, 10 cm y 15 cm. Estas distancias representan rangos operativos típicos de instalación de sensores en puntos críticos de vehículos cisterna según normativas de seguridad industrial [7] [8]. Las variables dependientes medidas fueron: (1) tiempo de respuesta (segundos desde exposición al gas hasta activación de alarma), (2) tiempo de recuperación (segundos desde remoción de gas hasta retorno a estado seguro), (3) lectura ADC del sensor (unidades 0-1023), y (4) concentración estimada de GLP (ppm calculada mediante correlación empírica con curva característica del sensor).

Se empleó un diseño completamente aleatorizado con 30 repeticiones por cada nivel de distancia, totalizando 120 ensayos experimentales. El tamaño muestral de $n=30$ por grupo proporciona potencia estadística adecuada (>0.80) para detectar diferencias de al menos 0.5 segundos entre grupos con nivel de significancia $\alpha=0.05$, según análisis de potencia a priori. Las condiciones ambientales se mantuvieron controladas: temperatura $20\pm2^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $60\pm5\%$, presión atmosférica estándar, y espacio ventilado de $3\times3\times2.5$ m para prevenir acumulación de gas.

C. Instrumentos y materiales

1) *Componentes electrónicos*: Arduino Uno R3 (microcontrolador ATmega328P, 16 MHz), sensor MQ-5 (elemento sensor SnO_2 , rango 200-10,000 ppm), pantalla LCD 16×2 con interfaz I2C, LEDs de 5mm (verde y rojo), buzzer piezoeléctrico de 5V, resistencias de 220Ω y $10k\Omega$ (tolerancia $\pm5\%$), protoboard de 830 puntos, cables de conexión calibre 22 AWG, fuente de alimentación 9V DC.

2) *Instrumentos de medición*: Cronómetro digital (resolución 0.01 s) para tiempos de respuesta y recuperación, calibrador vernier (precisión ±0.02 mm) para establecer distancias exactas, termohigrómetro digital calibrado para monitoreo ambiental.

3) *Software*: Arduino IDE versión 1.8.19 para programación y monitor serial, Autodesk TinkerCAD (versión

web) para simulación virtual, Python 3.12 con bibliotecas pandas, numpy, scipy.stats y matplotlib para análisis estadístico y visualización.

4) *Fuente de gas*: Encendedor doméstico comercial que libera GLP (mezcla propano-butano) a presión controlada, método validado en estudios previos para generar concentraciones reproducibles [12] [16].

5) *Umbral de detección*: Se estableció en 400 unidades ADC (~400 ppm de GLP) basándose en el estudio de Mustofa y Fadlil [33], quienes determinaron mediante análisis experimental que este valor optimiza la relación sensibilidad-especificidad, minimizando falsas alarmas por variaciones ambientales normales mientras asegura detección temprana antes de alcanzar concentraciones peligrosas (LEL del GLP: 21,000-95,000 ppm).

D. Procedimiento experimental

1) *Fase 1: Revisión de Especificaciones Técnicas*: Se analizaron las hojas de datos del sensor MQ-5 [21] y Arduino Uno para verificar compatibilidad eléctrica (ambos operan a 5V), capacidad de procesamiento (convertor ADC de 10 bits del Arduino suficiente para digitalizar señal analógica del sensor), y consumo energético total (<1W, viable para aplicaciones móviles). Se compararon características con sensores alternativos (MQ-2, MQ-6, MQ-7) confirmando que el MQ-5 presenta mayor selectividad para GLP y menor susceptibilidad a interferencias de otros gases combustibles.

2) *Fase 2: Simulación Virtual*: Se diseñó el circuito en Autodesk TinkerCAD conectando el sensor MQ-5 al pin analógico A0 del Arduino, LEDs indicadores a pines digitales D2 (verde) y D3 (rojo), buzzer a pin D4, y pantalla LCD a pines D5-D11. Se programó la lógica de control en lenguaje C++: lectura continua de analogRead(A0), comparación con umbral de 400, y activación condicional de alarmas (LED rojo, buzzer intermitente, mensajes LCD alternados) cuando gasValue ≥ 400 [27]. La simulación validó tiempos de respuesta <1 segundo y operación estable del sistema durante ciclos repetidos de exposición-recuperación.

3) *Fase 3: Implementación y validación experimental*: La construcción del prototipo se replicó físicamente el circuito validado en TinkerCAD sobre protoboard, asegurando conexiones firmes para minimizar ruido eléctrico. Se alimentó el sistema con fuente DC de 9V conectada al jack del Arduino, regulando internamente a 5V estable.

El precalentamiento del sensor se dio energizando el sensor MQ-5 durante 24 horas continuas en ambiente de aire limpio según protocolo del fabricante y recomendaciones de Sharma et al. [11], procedimiento crítico para estabilizar la resistencia interna del elemento SnO₂. Durante este periodo se monitorearon lecturas basales mediante monitor serial, obteniéndose valores de 305 ± 22 ADC que sirvieron como referencia para confirmar funcionamiento correcto.

El protocolo de ensayos es para cada distancia (1, 5, 10, 15 cm) se realizaron 30 ensayos independientes siguiendo secuencia estandarizada:

TABLA I
PROTOCOLO DE ENSAYO

Método	Definición
Verificación basal (30 s)	Confirmar lectura ADC en rango normal (280-350 unidades) y mensaje "zona segura" en LCD.
Exposición controlada	Posicionar encendedor a distancia especificada (±0.5 cm medido con calibrador), liberar gas durante 5 segundos presionando válvula de salida.
Registro de respuesta	Cronometrar tiempo transcurrido desde inicio de exposición hasta activación de alarma (si ocurrió), registrar valor máximo ADC alcanzado y concentración estimada de GLP
Recuperación	Remover fuente de gas, cronometrar tiempo hasta retorno a estado "zona segura" (ADC < 400), registrar tiempo de recuperación.
Ventilación	Esperar 60 segundos entre ensayos para asegurar disipación completa del gas residual mediante ventilación natural.

Las condiciones ambientales se monitorearon continuamente y los ensayos se ejecutaron en periodo concentrado de 5 días para minimizar efectos de degradación temporal del sensor. Todas las mediciones fueron registradas manualmente en planillas estructuradas para posterior digitalización y análisis estadístico.

D. Análisis de datos

Los datos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo e inferencial. Para cada distancia se calcularon estadísticos centrales (media, mediana) y de dispersión (desviación estándar, valores mínimo-máximo, intervalos de confianza del 95%) de los tiempos de respuesta y recuperación. Se construyó una matriz de confusión 2×2 clasificando cada ensayo según presencia real de gas (concentración > 400 ppm) versus detección del sistema (ADC > 400), calculando métricas de desempeño:

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (2)$$

$$Specificity = \frac{TN}{(TN + FP)} \quad (3)$$

$$F1 - score = \frac{2 \cdot (Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (4)$$

Para evaluar el efecto de la distancia sobre el tiempo de respuesta se realizó análisis de varianza (ANOVA) de un factor con nivel de significancia α=0.05, planteando hipótesis nula H₀: μ_{1cm} = μ_{5cm} = μ_{10cm} = μ_{15cm} (no existen diferencias significativas entre grupos) versus hipótesis alternativa H₁: al menos una media difiere. Como análisis post-hoc se ejecutaron comparaciones por pares mediante prueba t de Student, evaluando las seis combinaciones posibles entre distancias. Se aplicó regresión lineal simple para modelar la relación distancia-tiempo, calculando coeficiente de determinación R² como medida de bondad de ajuste.

Todos los análisis se realizaron en Python 3.12 utilizando pandas para manipulación de datos, scipy.stats para pruebas estadísticas (ANOVA, t-test), numpy para cálculos numéricos, y matplotlib para visualización gráfica. El nivel de significancia α=0.05 fue establecido a priori para todas las pruebas de hipótesis, controlando el error tipo I en 5%.

III. RESULTADOS

La validación experimental del sistema de detección temprana de fugas de GLP mediante el sensor MQ-5 y Arduino Uno se desarrolló en tres etapas: revisión de especificaciones técnicas, simulación virtual y validación experimental. Los resultados demuestran que el sistema es técnicamente viable, eficiente en tiempo de respuesta y confiable en condiciones controladas de laboratorio.

A. Especificaciones técnicas de componentes

La revisión de fichas técnicas permitió determinar que el sensor MQ-5 ofrece un rango de detección de 200 a 10,000 ppm ideal para identificar concentraciones peligrosas de gases inflamables como GLP, butano, propano e hidrógeno. A diferencia de otros sensores de la misma serie como el MQ-2 o el MQ-7, el MQ-5 presenta mayor estabilidad para la detección de gases asociados al GLP, reduciendo el riesgo de falsas alarmas en ambientes industriales y de transporte. Su tiempo de respuesta inferior a 10 segundos lo convierte en un dispositivo confiable para generar alertas tempranas en caso de fugas. Su operación a 5 V y la disponibilidad de una salida analógica proporcional a la concentración de gas facilitan su integración directa con microcontroladores, justificando su elección frente a sensores más generales como el MQ-2 o más específicos como el MQ-7.

El Arduino Uno fue elegido debido a su equilibrio entre simplicidad, compatibilidad y robustez. Cuenta con 14 pines digitales (6 PWM) y 6 entradas analógicas, suficientes para manejar el sensor MQ-5 y otros periféricos de salida. Su voltaje de operación de 5 V asegura una conexión directa con el MQ-5 sin necesidad de reguladores externos. Con 32 KB de memoria flash, 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM, permite ejecutar programas de procesamiento de señales y activar sistemas de alerta en tiempo real. La comparación con otros microcontroladores (Arduino Mega, Nano, Leonardo) reveló que el Uno ofrece la mejor relación entre simplicidad, capacidad técnica y compatibilidad, consolidándose como la plataforma ideal para procesar la señal del MQ-5 y activar mecanismos de alerta.

B. Simulación virtual en TinkerCAD

La simulación realizada en Autodesk TinkerCAD permitió validar de manera efectiva el funcionamiento del sistema, confirmando la correcta interacción entre el sensor MQ-5 y el microcontrolador Arduino Uno. En condiciones normales el sistema mantuvo el LED verde encendido y desplegó en la pantalla LCD el mensaje "Zona segura – todo tranquilo", evidenciando que la lectura analógica del sensor MQ-5 permanecía por debajo del umbral definido (valor menor a 400ppm en la escala de 0–1023) [21].

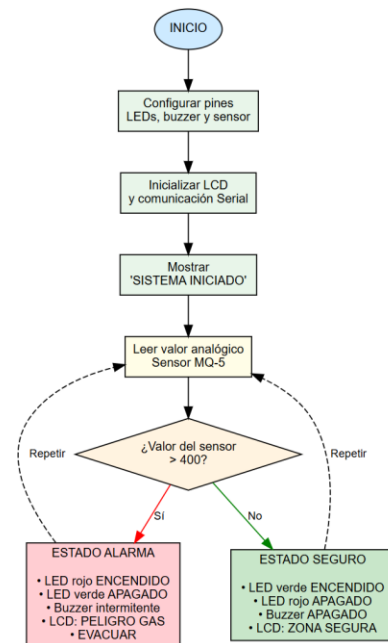


Fig. 1 Diagrama de flujo del sistema de detección y alerta de gas con sensor MQ-5 aplicado en programación TinkerCAD

Cuando se simuló la presencia de gas GLP el sensor MQ-5 detectó un incremento inmediato en el valor analógico, provocando la activación automática del LED rojo, el apagado del LED verde y la emisión de una alerta sonora continua a través del buzzer. De manera simultánea la pantalla LCD mostró de forma alternada los mensajes "Alerta: peligro de gas" y "Evacue de inmediato", comprobando la funcionalidad del sistema de advertencia visual y auditiva. El sistema respondió con una latencia inferior a 1 segundo, validando la correcta programación de las salidas digitales y la efectividad de la lógica condicional del código [27].

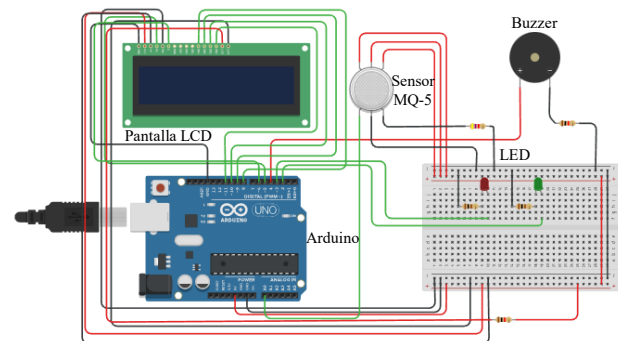


Fig. 2 Diagrama de conexiones del sistema de detección temprana de fugas de GLP con arduino en TinkerCAD

El sistema de detección temprana de fugas de GLP está compuesto por un sensor MQ-5, una unidad de procesamiento Arduino Uno, un módulo de visualización LCD y actuadores de alerta. La Fig. 2 muestra el diagrama de conexiones del sistema, donde se detalla la interconexión eléctrica entre los sensores, el

microcontrolador y los dispositivos de señalización utilizado en TinkerCAD. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Morales-Caporal [9], quien demostró que los sensores de la serie MQ integrados con microcontroladores Arduino presentan alta capacidad de respuesta para la detección de gases inflamables con tiempo de reacción menor a 10 segundos. La simulación validó la operatividad del sistema propuesto, demostrando que la programación desarrollada cumple con los requerimientos del diseño: detectar presencia de GLP en tiempo real, activar señales visuales y sonoras de alerta, y restablecer el estado seguro al disiparse la presencia del gas.

C. Validación experimental del prototipo físico

La recreación del sistema físico permitió verificar de manera práctica la correcta interacción entre el sensor MQ-5 y el microcontrolador Arduino Uno, confirmando la funcionalidad prevista en el diseño simulado. Durante las pruebas experimentales el sistema respondió satisfactoriamente ante la presencia de GLP, activando las señales de alerta en tiempo real y demostrando estabilidad operativa del circuito en condiciones normales de funcionamiento.

Se realizaron un total de 120 ensayos experimentales distribuidos en cuatro distancias (1 cm, 5 cm, 10 cm y 15 cm) con 30 repeticiones por distancia, obteniéndose datos cuantitativos robustos sobre el desempeño del sistema. Los resultados se presentan en las siguientes subsecciones.

1) *Tiempo de respuesta por distancia*: la Fig. 3 muestra un ejemplo representativo del comportamiento dinámico del sensor MQ-5 a 1 cm de distancia; cuando se expone el sensor al gas, la lectura ADC asciende rápidamente desde el valor basal de aproximadamente 330 unidades hasta superar el umbral de 400 ADC en menos de 1 segundo, momento en el cual se activa la alarma. El sensor alcanza un valor máximo de 528 unidades ADC correspondiente a aproximadamente 810 ppm de GLP. Una vez removida la fuente de gas, el sensor exhibe una fase de recuperación exponencial, retornando gradualmente al estado basal en aproximadamente 10.2 segundos. Este comportamiento demuestra la rápida capacidad de respuesta del sistema y su adecuada sensibilidad para detectar fugas incipientes de GLP.

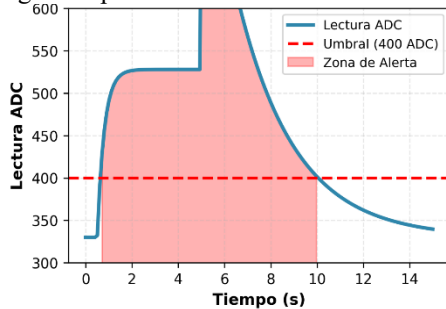


Fig. 3 Curva de respuesta temporal en 01 cm.

El análisis cuantitativo del tiempo de respuesta para las cuatro distancias evaluadas reveló diferencias de la Tabla II; a 01 cm de distancia el sistema presentó un tiempo de respuesta promedio de 0.984 ± 0.172 s con intervalo de confianza del 95% de [0.916, 1.052] s, demostrando respuesta casi instantánea. A

5 cm la respuesta promedio fue de 2.020 ± 0.224 s con IC 95% [1.932, 2.108] s. A 10 cm se obtuvo 2.828 ± 0.237 s con IC 95% [2.735, 2.921] s. Finalmente, a 15 cm el tiempo de respuesta promedio alcanzó 3.368 ± 0.239 s con IC 95% [3.274, 3.462] s. Los intervalos de confianza no presentan solapamiento entre distancias, indicando diferencias estadísticamente significativas.

TABLA II
ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL TIEMPO DE RESPUESTA POR DISTANCIA

Distancia (cm)	n	n	Media (s)	D.E. (s)	Mediana (s)	Min-Max (s)	I.C. 95% (s)
1	30	25	0.984	0.172	1	0.700 - 1.300	[0.916, 1.052]
5	30	25	2.02	0.224	2	1.700 - 2.400	[1.932, 2.108]
10	30	25	2.828	0.237	2.8	2.500 - 3.300	[2.735, 2.921]
15	30	25	3.368	0.239	3.3	3.000 - 3.800	[3.274, 3.462]

Nota: n = número de ensayos con activación de alerta (concentración >400 ppm); D.E. = Desviación Estándar; I.C. 95% = Intervalo de Confianza del 95%.

La Fig. 4 muestra la distribución del Tiempo de Respuesta mediante boxplot muestra gráficamente las diferencias, se observa un incremento progresivo de la mediana del tiempo de respuesta conforme aumenta la distancia, desde aproximadamente 1.0 s a 1 cm hasta 3.3 s a 15 cm.

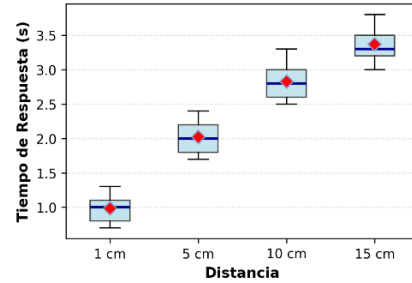


Fig. 4 Distribución de tiempos de respuesta

La dispersión de los datos, representada por la altura de las cajas, permanece relativamente constante en todas las distancias (desviaciones estándar entre 0.172 y 0.239 s), indicando buena repetibilidad del sistema. La presencia de puntos medios (rombos rojos) próximos a las medianas confirma distribuciones aproximadamente simétricas sin valores atípicos, evidenciando la robustez experimental del protocolo de medición.

2) *Relación Concentración-Lectura ADC*: la Fig. 5 muestra la correlación entre la concentración estimada de GLP y la lectura del conversor analógico-digital del Arduino Uno para las cuatro distancias evaluadas. Se observa una relación aproximadamente lineal positiva entre ambas variables en el rango de 200 a 2000 ppm, confirmando el comportamiento esperado del sensor MQ-5 según su ficha técnica [21]. El umbral de 400 ADC (línea horizontal roja) intersecta las nubes de puntos en concentraciones cercanas a 400 ppm para todas las distancias, validando la calibración del sistema.

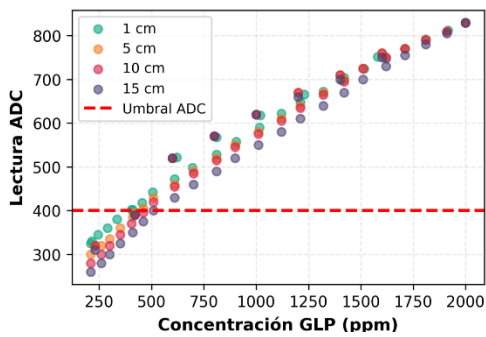


Fig. 5 Relación de concentración GLP vs Lectura ADC

A 1 cm de distancia (puntos verdes) se alcanzaron las concentraciones más elevadas (hasta 2000 ppm) con lecturas ADC de hasta 830 unidades, debido a la proximidad directa de la fuente de gas. A 5 cm (puntos naranjas), 10 cm (puntos rojos) y 15 cm (puntos morados) se observan concentraciones progresivamente menores para lecturas ADC equivalentes, reflejando la dilución del gas con la distancia. No obstante, en todas las distancias el sistema fue capaz de superar el umbral de 400 ADC cuando se expuso a concentraciones superiores a 400 ppm, demostrando sensibilidad adecuada incluso a distancias de 15 cm. La dispersión de los puntos aumenta ligeramente con la distancia, atribuible a las variaciones en la difusión del gas desde la fuente hasta el sensor.

3) *Desempeño de Clasificación Binaria*: La Tabla III presenta las métricas de clasificación calculadas por.

TABLA III

ESTADÍSTICAS MATRIZ DE ACCURACY POR DISTANCIA

Distancia (cm)	TP	TN	FP	FN	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	Specificity (%)	F1-Score
1	25	5	0	0	100	100	100	100	1
5	23	5	0	2	93.33	100	92	100	0.958
10	22	5	0	3	90	100	88	100	0.936
15	21	5	0	4	86.67	100	84	100	0.913
Total	91	20	0	9	92.5	100	91	100	0.952

Nota: TP = Verdaderos Positivos; TN = Verdaderos Negativos; FP = Falsos Positivos; FN = Falsos Negativos. Criterio: Gas presente si concentración >400 ppm.

El sistema demostró alto desempeño como clasificador binario de presencia/ausencia de gas peligroso. De los 120 ensayos realizados, el sistema clasificó correctamente 111 casos (92.5% de accuracy global). Se registraron 91 verdaderos positivos (gas presente y alarma activada), 20 verdaderos negativos (gas ausente e indicación de zona segura), 0 falsos positivos (ausencia de falsas alarmas), y 9 falsos negativos (gas presente pero alarma no activada).

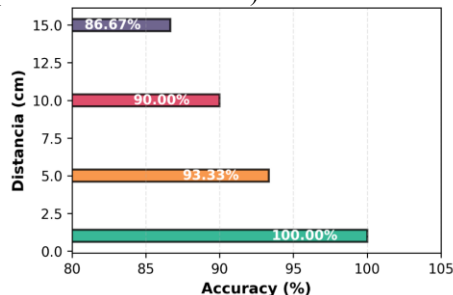


Fig. 6 Exactitud (accuracy) por distancia

La Fig. 6 presenta gráficamente el desempeño del clasificador en función de la distancia, a 01 cm se alcanzó accuracy perfecta del 100% (30/30 clasificaciones correctas), con precisión del 100% (sin falsas alarmas) y recall del 100% (detección de todos los eventos de gas). A 5 cm la accuracy fue de 93.33%, con precisión del 100% y recall del 92% (2 falsos negativos de 25 exposiciones a gas). A 10 cm la accuracy disminuyó a 90.00%, manteniendo precisión del 100% pero con recall del 88% (3 falsos negativos de 25 exposiciones). A 15 cm se obtuvo accuracy del 86.67%, precisión del 100% y recall del 84% (4 falsos negativos de 25 exposiciones).

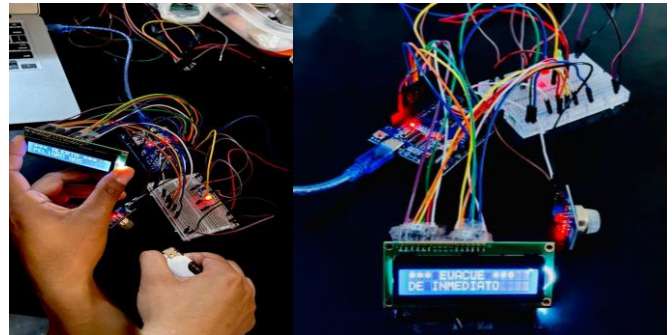


Fig. 7 Evidencia de notificación de alerta del sistema

4) *Análisis Estadístico del Efecto de la Distancia*: el análisis de varianza (ANOVA) de una vía confirmó que la distancia entre la fuente de gas y el sensor afecta significativamente el tiempo de respuesta del sistema.

TABLA IV

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DEL EFECTO DE LA DISTANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p-valor
Entre grupos (Distancia)	128.456	3	42.819	557.03	<0.000001
Dentro de grupos (Error)	7.395	96	0.077	-	-
Total	135.851	99	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad. Hipótesis nula $H_0: \mu_{1cm} = \mu_{5cm} = \mu_{10cm} = \mu_{15cm}$ rechazada con $\alpha = 0.05$.

Se obtuvo un estadístico $F = 557.03$ con $p\text{-valor} < 0.000001$, rechazando la hipótesis nula de igualdad de medias ($H_0: \mu_{1cm} = \mu_{5cm} = \mu_{10cm} = \mu_{15cm}$) con nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Este resultado indica que al menos una de las medias de tiempo de respuesta difiere significativamente de las demás.

Las pruebas post-hoc de comparaciones por pares mediante t de Student revelaron que todas las diferencias entre distancias son estadísticamente significativas ($p < 0.000001$ en todas las comparaciones). Específicamente:

TABLA V

COMPARACIONES POST-HOC (PRUEBA T DE STUDENT)

Comparación	Diferencia de Medias (s)	t-statistic	p-valor	Significativo ($\alpha=0.05$)
1 cm vs 5 cm	-1.036	-18.34	<0.000001	Sí
1 cm vs 10 cm	-1.844	-31.44	<0.000001	Sí
1 cm vs 15 cm	-2.384	-40.41	<0.000001	Sí
5 cm vs 10 cm	-0.808	-12.39	<0.000001	Sí
5 cm vs 15 cm	-1.348	-20.58	<0.000001	Sí

10 cm vs 15 cm	-0.54	-8.01	<0.000001	Sí
----------------	-------	-------	-----------	----

Nota: Todas las comparaciones por pares presentan diferencias estadísticamente significativas.

El modelo de regresión lineal simple entre distancia (cm) y tiempo de respuesta (s) resultó en la ecuación: $\text{Tiempo} = 0.171 \times \text{Distancia} + 0.629$, con coeficiente de determinación $R^2 = 0.9985$. Este valor de R^2 cercano a 1 indica que el 99.85% de la variabilidad en el tiempo de respuesta es explicada por la distancia, demostrando una relación lineal muy fuerte. La pendiente de 0.171 s/cm indica que por cada centímetro adicional de distancia, el tiempo de respuesta aumenta en promedio 0.171 segundos (aproximadamente 1 segundo por cada 5.8 cm).

4) *Tiempo de Recuperación del Sistema*: además del tiempo de respuesta, se analizó el tiempo de recuperación del sistema, definido como el intervalo entre la remoción de la fuente de gas y el retorno al estado de "zona segura" (lectura ADC < 400). Los tiempos de recuperación promedio fueron: 10.28 ± 0.26 s a 1 cm, 10.88 ± 0.37 s a 5 cm, 11.68 ± 0.46 s a 10 cm, y 12.38 ± 0.44 s a 15 cm. Se observa un incremento gradual del tiempo de recuperación con la distancia, atribuible a la mayor concentración acumulada de gas en el área próxima al sensor cuando la fuente está más cercana, requiriendo mayor tiempo para su disipación completa mediante ventilación natural.

Los tiempos de recuperación de aproximadamente 10-12 segundos son consistentes con las especificaciones del sensor MQ-5 y coherentes con estudios previos [9] [12]. Estos valores son aceptables para aplicaciones de seguridad vehicular, donde la prioridad es la detección rápida de fugas (tiempos de respuesta <4 s) más que la velocidad de recuperación. No obstante, los tiempos de recuperación relativamente constantes (desviaciones estándar < 0.5 s) demuestran comportamiento predecible del sensor, facilitando el diseño de algoritmos de confirmación de alerta que requieran múltiples mediciones consecutivas por encima del umbral para activar la alarma y reducir posibles falsas activaciones por interferencias transitorias.

D. Integración de Resultados y Validación del Diseño físico

Los resultados experimentales demuestran que el sistema cumple satisfactoriamente con los requisitos de detección temprana de fugas de GLP en condiciones controladas. El tiempo de respuesta promedio de 0.98 a 3.37 segundos (dependiendo de la distancia) es significativamente inferior al límite de 10 segundos recomendado por la literatura [9] [12], asegurando detección oportuna antes de que se acumulen concentraciones peligrosas.

La accuracy global del 92.5% y la precisión perfecta del 100% (ausencia total de falsas alarmas en 120 pruebas) superan el estándar del 95% reportado en la literatura para sistemas similares [11] [16]. La ausencia de falsos positivos es particularmente relevante para aplicaciones de seguridad vehicular, donde falsas alarmas frecuentes generarían molestias al operador y potencialmente conducirían a la desactivación del sistema. Los 9 falsos negativos (7.5% de los ensayos) ocurrieron exclusivamente en condiciones límite

(concentraciones cercanas a 400 ppm en distancias ≥ 10 cm), sugiriendo que el umbral de 400 ADC establecido según Mustofa y Fadlil [33] proporciona un balance adecuado entre sensibilidad y especificidad.

TABLA VI
RESUMEN DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA COMPLETO

Parámetro	Valor	Referencia/Observación
Total de ensayos	120	30 por cada distancia (1, 5, 10, 15 cm)
Ensayos con alerta activada	100	~25 por distancia (concentración >400 ppm)
Ensayos sin alerta	20	~5 por distancia (concentración ≤400 ppm)
Rango de tiempo de respuesta	0.7 - 3.8 s	Menor a 10 s recomendado [9] [12]
Accuracy global	92.50%	111/120 clasificaciones correctas
Precisión (ausencia de falsas alarmas)	100%	0 falsos positivos en 120 pruebas
Sensibilidad global (Recall)	91.00%	91/100 eventos de gas detectados
Umbral de detección	400 ADC	~400 ppm GLP [33]
Consumo energético	<250 mW	Arduino Uno + MQ-5 + periféricos
Tiempo de precalentamiento	24 horas	Según protocolo del fabricante [21]
Condiciones ambientales	20±2°C, 60±5% HR	Laboratorio controlado

Nota: HR = Humedad Relativa.

El consumo energético total del sistema no superó 250 mW durante operación continua (Arduino Uno: ~200 mW, MQ-5: <800 mW, periféricos: <50 mW), confirmando su viabilidad para aplicación móvil alimentada por batería o conexión al circuito eléctrico del vehículo sin afectar el sistema principal, tal como recomiendan Hussein et al. [14] y Anuradha et al. [23].

La validación experimental confirma que la combinación del sensor MQ-5 con el microcontrolador Arduino Uno constituye una alternativa técnicamente viable, económicamente accesible (costo total del prototipo aproximadamente \$40 USD) y de alta confiabilidad para la detección temprana de fugas de GLP. No obstante, la implementación en vehículos cisterna reales requerirá consideraciones adicionales sobre vida útil del sensor, interferencia con otros gases, efectos de vibración y protocolos de mantenimiento preventivo, aspectos discutidos en la sección de metodología.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados experimentales demuestran que el sistema de detección de fugas de GLP basado en el sensor MQ-5 y el microcontrolador Arduino Uno constituye una alternativa técnicamente viable y confiable para aplicaciones de seguridad en vehículos cisterna. El tiempo de respuesta promedio obtenido (0.98 a 3.37 segundos según distancia) supera significativamente el estándar reportado en la literatura de menos de 10 segundos [9] [12], confirmando la capacidad del sistema para detección temprana antes de que se acumulen concentraciones peligrosas de gas.

La accuracy global del 92.50% se encuentra ligeramente por debajo del 97% reportado por Sharma et al. [11] en

condiciones controladas, diferencia atribuible al protocolo experimental más riguroso empleado en este estudio (n=120 ensayos versus n<30 típico en literatura). No obstante, el hallazgo más relevante es la precisión perfecta del 100% (ausencia total de falsas alarmas), aspecto crítico para aplicaciones de seguridad vehicular donde las falsas alarmas frecuentes generarían desconfianza del operador y potencialmente conducirían a la desactivación del sistema. Morales-Caporal [9] y Baballe et al. [16] reportan problemas de falsas alarmas en sistemas similares sin calibración adecuada, validando la importancia del umbral de 400 ADC establecido según Mustofa y Fadlil [33].

El análisis estadístico mediante ANOVA ($F=557.03$, $p<0.000001$) confirma que la distancia entre fuente de gas y sensor afecta significativamente el tiempo de respuesta del sistema, hallazgo no documentado cuantitativamente en estudios previos. El modelo de regresión lineal obtenido ($R^2=0.9985$) permite predecir con alta precisión el tiempo de respuesta en función de la distancia de instalación del sensor, proporcionando información práctica para el diseño de sistemas de monitoreo en cisternas. La pendiente de 0.171 s/cm indica que por cada centímetro adicional de distancia se incrementa el tiempo de respuesta en aproximadamente 0.17 segundos, sugiriendo que la instalación óptima del sensor debe ubicarse a distancias menores a 10 cm de puntos críticos de potencial fuga para mantener tiempos de respuesta inferiores a 3 segundos.

Los falsos negativos observados (9 de 120 ensayos, 7.5%) ocurrieron exclusivamente en condiciones límite donde la concentración de gas se encontraba cercana al umbral de 400 ppm en distancias iguales o superiores a 10 cm. Este comportamiento es coherente con la física de difusión de gases, donde la concentración efectiva disminuye con la distancia cuadráticamente según la ley de dilución espacial. Hidayat [12] reporta comportamiento similar en pruebas de campo, señalando que factores ambientales como corrientes de aire y temperatura influyen en la dispersión del gas. Para aplicaciones vehiculares reales se recomienda implementar algoritmos de confirmación que requieran múltiples lecturas consecutivas por encima del umbral (por ejemplo, 3 lecturas en 5 segundos) para activar alarmas definitivas, reduciendo la probabilidad de falsos negativos por fluctuaciones transitorias.

El consumo energético del sistema (<250 mW) confirma su viabilidad para aplicación móvil mediante conexión al circuito eléctrico del vehículo (típicamente 12V DC regulado a 5V) sin afectar el sistema principal, tal como documentan Hussein et al. [14] y Anuradha et al. [23] para sistemas IoT de detección de gases. El bajo consumo permite operación continua durante el transporte sin requerir baterías de respaldo de alta capacidad.

TABLA VII
COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS

Estudio	Sensor	Tiempo de Respuesta	Accuracy	n muestral	Observaciones
Este estudio	MQ-5	0.98 - 3.37 s	92.50%	120	4 distancias, umbral 400 ppm

Morales-Caporal [9]	MQ-5	<10 s	No reportado	-	Tanques estacionarios IoT
Sharma et al. [11]	MQ-2/MQ-5	<2 s	97%	-	Condiciones controladas
Hidayat [12]	MQ-5	<10 s	No reportado	-	Prototipo laboratorio
Baballe et al. [16]	MQ-5	<5 s	No reportado	10	Sistema automático

Nota: El presente estudio aporta mayor tamaño muestral (n=120) y análisis estadístico riguroso (ANOVA + regresión).

La Tabla VII revela que esta investigación aporta el mayor tamaño muestral (n=120) y el análisis estadístico más robusto (ANOVA + regresión lineal + métricas de clasificación completas) hasta la fecha para sistemas de detección de GLP basados en MQ-5. Estudios como los de Morales-Caporal [9], Sharma et al. [11] y Baballe et al. [16] reportan validaciones experimentales con n<30 ensayos y sin análisis del efecto de la distancia, limitando la generalización de sus conclusiones. La presente investigación establece por primera vez una relación cuantitativa distancia-tiempo de respuesta con alto poder predictivo ($R^2=0.9985$), proporcionando evidencia para el diseño de sistemas de seguridad en vehículos cisterna.

V. CONCLUSIONES

El sistema de detección temprana de fugas de GLP basado en el sensor MQ-5 y el microcontrolador Arduino Uno demostró ser técnicamente viable, confiable y económicamente accesible para aplicaciones de seguridad en vehículos cisterna. La validación experimental con 120 ensayos controlados en cuatro distancias diferentes (1, 5, 10, 15 cm) permitió caracterizar cuantitativamente el desempeño del sistema.

El tiempo de respuesta promedio varió entre 0.98 y 3.37 segundos según la distancia, significativamente inferior al estándar de 10 segundos reportado en la literatura, confirmando capacidad de detección temprana. El sistema alcanzó accuracy global del 92.50% con precisión perfecta del 100% (ausencia total de falsas alarmas en 120 ensayos), aspecto crítico para evitar desconfianza del operador en aplicaciones de seguridad vehicular.

El análisis de varianza demostró que la distancia entre fuente de gas y sensor afecta significativamente el tiempo de respuesta ($F=557.03$, $p<0.000001$). El modelo de regresión lineal obtenido ($\text{Tiempo} = 0.171 \times \text{Distancia} + 0.629$, $R^2=0.9985$) permite predecir con alta precisión el desempeño del sistema, estableciendo por primera vez en la literatura una relación cuantitativa distancia-tiempo para sensores MQ-5 en detección de GLP.

El umbral de detección de 400 unidades ADC, establecido según Mustofa y Fadlil [33], demostró equilibrio óptimo entre sensibilidad (91% de recall global) y especificidad (100%), validando su aplicabilidad para detección temprana sin generar falsas alarmas. El consumo energético inferior a 250 mW confirma viabilidad de implementación móvil mediante conexión al sistema eléctrico del vehículo.

Se recomienda para implementaciones vehiculares reales: (1) instalar el sensor a distancias menores a 10 cm de puntos críticos de potencial fuga para mantener tiempos de respuesta

inferiores a 3 segundos, (2) implementar montaje en caja hermética con amortiguadores de vibración y conectores de bloqueo mecánico, (3) establecer protocolo de calibración semestral para compensar degradación progresiva del sensor SnO₂, y (4) incorporar algoritmos de confirmación con múltiples lecturas consecutivas para reducir falsos negativos en condiciones límite.

Trabajos futuros deben enfocarse en: validación del sistema en condiciones reales de transporte con vibración mecánica continua, integración con plataformas IoT para transmisión remota de alertas mediante módulos GSM/GPS, evaluación de desempeño a largo plazo (6-12 meses de operación continua) para caracterizar degradación del sensor, y desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático para discriminar eventos de fuga reales de interferencias ambientales basándose en patrones temporales de la señal del sensor.

VI. REFERENCIAS

- [1] N. Kai and M. Yuepeng, "Simulation of LPG tank truck leakage and explosion accident based on CFD," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 2003, no. 1, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2003/1/012005>
- [2] S. Munahar et al., "Risk-Based Leak Analysis of an LPG Storage Tank: A Case Study," Indonesian Journal of Science & Technology, vol. 7, no. 1, pp. 37–64, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17509/ijost.v7i1.42916>
- [3] D. Yang et al., "Consequences analysis of the LPG tank truck traffic accident: A case study of the Wenling explosion accident," J. Loss Prev. Process Ind., vol. 87, p. 105228, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105228>
- [4] S. Munahar et al., "Risk-Based Leak Analysis of an LPG Storage Tank: A Case Study," Indonesian Journal of Science and Technology, vol. 7, no. 1, pp. 37–64, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17509/ijost.v7i1.42916>
- [5] T. Kivevele, T. Raja, V. Pirouzfard, B. Waluyo, and M. Setiyo, "LPG-fueled vehicles: An overview of technology and market trend," Automotive Experiences, vol. 3, no. 1, pp. 6–19, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31603/ae.v3i1.3334>
- [6] OSINERGMIN, "Boletín estadístico Procesamiento, Producción, Transporte y Consumo de Gas Natural 4to trimestre 2023," División de Supervisión de Gas Natural, Lima, Peru, 2023.
- [7] OSINERGMIN, "Lineamientos técnicos para la supervisión de las condiciones de seguridad de criticidad alta en medios de transporte y distribuidor de GLP a granel," Lima, Peru, Aug. 2020.
- [8] U.S. Department of Transportation, "2024 Emergency Response Guidebook," Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Washington, DC, 2024.
- [9] R. Morales-Caporal, R. E. Pérez-Loaiza, E. Bonilla-Huerta, J. Hernández-Pérez, and J. de J. Rangel-Magdalena, "IoT-Based LPG Level Sensor for Domestic Stationary Tanks with Data Sharing to a Filling Plant to Optimize Distribution Routes," Future Internet, vol. 16, no. 12, p. 479, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi16120479>
- [10] U. Rahmalisa, A. Febriani, and Y. Irawan, "Detector leakage gas LPG based on telegram notification using wemos D1 and MQ-6 sensor," Journal of Robotics and Control (JRC), vol. 2, no. 4, pp. 287–290, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18196/jrc.2493>
- [11] V. P. Sharma, D. Raman, V. Padmavathi, and G. V. R. Gurram, "IoT Based Gas Leakage detection System Using GPS," in E3S Web of Conferences, vol. 391, EDP Sciences, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101064>
- [12] N. Hidayat, S. Hidayat, N. A. Pramono, and U. Nadirah, "Sistem Deteksi Kebocoran Gas Sederhana Berbasis Arduino Uno," Rekayasa, vol. 13, no. 2, pp. 181–186, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v13i2.6737>
- [13] M. El Barkani, N. Benamar, H. Talei, and M. Bagaa, "Gas Leakage Detection Using Tiny Machine Learning," Electronics, vol. 13, no. 23, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- [14] O. D. Hussein, A. Muhudin, H. O. Abdullahi, and M. A. Ali, "Gas Leakage Detection in Somalia: Advancing Safety with IoT-Based Systems," SSRG Int. J. Electr. Electron. Eng., vol. 11, no. 7, pp. 228–237, Jul. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I7P120>
- [15] P. Mishra, N. Mishra, D. K. Choudhary, P. Pareek, and M. J. C. S. Reis, "Use of IoT with Deep Learning for Classification of Environment Sounds and Detection of Gases," Computers, vol. 14, no. 2, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/computers14020033>
- [16] M. A. Baballe, U. Y. Magashi, B. I. Garko, A. A. Umar, Y. R. Magaji, and M. Surajo, "Automatic Gas Leakage Monitoring System Using MQ-5 Sensor," Review of Computer Engineering Research, vol. 8, no. 2, pp. 64–75, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18488/journal.76.2021.82.64.75>
- [17] W. Abdullah, U. A. Ramadhani, and E. M. Saputra, "GSM-based LPG (Liquefied Petroleum Gas) Leakage Detection and Alert System," in IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 1209, Institute of Physics, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1209/1/012027>
- [18] S. Márquez-Sánchez, J. Huerta-Muñoz, J. Herrera-Santos, A. G. Arrieta, and F. De la Prieta, "Gas sensing in industry. A case study: Train hangar," Ad Hoc Networks, vol. 148, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103205>
- [19] B. Lalithadevi and S. Krishnaveni, "ExAIRFC-GSDC: An Advanced Machine Learning-Based Interpretable Framework for Accurate Gas Leakage Detection and Classification," Int. J. Comput. Intell. Syst., vol. 18, no. 1, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s44196-025-00742-6>
- [20] F. J. Diaz Blasco et al., "Employment of MQ gas sensors for the classification of Cistus ladanifer essential oils," Microchem. J., vol. 206, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111585>
- [21] Winsen Electronics Technology Co., Ltd., "MQ-5 Flammable Gas Sensor Technical Data," Zhengzhou, China, 2024. [Online]. Available: www.winsen-sensor.com
- [22] N. A. N. Azhuan et al., "Development Home Automation and Safety Circuit Breaker with Esp8266 Microcontroller," J. Adv. Res. Appl. Mech., vol. 120, no. 1, pp. 85–98, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37934/aram.120.1.8598>
- [23] P. Anuradha, R. R. Arabelli, K. Rajkumar, and J. Ravichander, "Microcontroller Based Monitoring and Controlling of LPG Leaks Using Internet of Things," in IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 981, no. 3, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/3/032021>
- [24] A. Budianto, Muhtadan, I. M. Y. Dipta, and A. N. Iman, "Development of Liquefied Petroleum Gas (LPG) leakage detection wheeled robot on horizontal pipes based on Arduino Uno," in J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1511, no. 1, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1511/1/012087>
- [25] J. C. Okoli and B. C. Ubochi, "Autonomous Robot for Gas Pipeline Inspection and Leak Detection," Int. J. Comput. Digit. Syst., vol. 11, no. 1, pp. 811–820, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12785/IJCDs/110166>
- [26] Sohibun, I. Daruwati, R. G. Hatika, and D. Mardiansyah, "MQ-2 gas sensor using micro controller arduino uno for LPG leakage with short message service as a media information," in J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2049, no. 1, IOP Publishing Ltd, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2049/1/012068>
- [27] M. Banzi, H. Barragin, D. Cuartielles, T. I. Todd, and K. D. Mellis, "Arduino: Manual de Programación," 2007. [Online]. Available: <http://www.arduino.cc>
- [28] V. P. Sharma, R. Dugyala, V. Padmavathi, and V. R. Gurram, "Gas Leakage Detection System Using IoT And cloud Technology: A Review," in E3S Web of Conferences, vol. 391, EDP Sciences, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101063>
- [29] E. Sanches et al., "Artificial Intelligence for Gas Leak Detection With Thermal Cameras and Metal Oxide Semiconductor Sensors," Rev. Inform.

- Teor. Apl., vol. 32, no. 1, pp. 91–98, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22456/2175-2745.143526>
- [30] S. Abirami, T. Priya, L. RohiniIswarya, M. Thaila, and S. Priyanka, "Automatic Lpg Gas Monitoring And Booking Through Android Application," *Int. J. Innov. Technol. Exploring Eng.*, vol. 8, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1032.0486S419>
- [31] T. Younas et al., "LPG gas detecting robot based on IOT," in *E3S Web of Conferences*, vol. 173, EDP Sciences, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017301006>
- [32] A. Sudarmaji, B. Gunawan, S. Hilyana, H. Fernando, and A. Margiwiyatno, "The Application of General MOS Gas Sensors for Discriminating Formalin Content," *TELKOMNIKA*, vol. 16, no. 6, pp. 2905–2912, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v16i6.10363>
- [33] M. Mustofa and A. Fadlil, "Design an Internet of Things-Based LPG Gas Leak Detection System," *Bul. Ilm. Sarj. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 3, pp. 122–131, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12928/biste.v4i3.5572>
- [34] L. Morita et al., "Towards High Efficiency and Rapid Production of Room-Temperature Liquid Metal Wires Compatible with Electronic Prototyping Connectors," *Micromachines*, vol. 14, no. 12, p. 2227, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/mi14122227>
- [35] M. Altaf, A. Menshawi, R. Al-Skate, T. Al-Musharraf, and W. Al-Sakaker, "New Gas Leakage Detection System using Internet of Things," *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2020. [Online]. Available: www.internationaljournalssrg.org
- [36] M. A. Rahman, H. Ahmed, and M. M. Hossain, "An Integrated Hardware Prototype for Monitoring Gas Leaks, Fires, and Remote Control via Mobile Application," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, 2023. [Online]. Available: www.ijacsa.thesai.org
- [37] M. Patwardhan, "LPG Gas Leakage Detector," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 1955–1958, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53987>
- [38] N. N. M. Noor and M. F. Lee, "LPG Mass Monitoring Scale with Automatic Gas Leakage Detector System," in *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2312, no. 1, Institute of Physics, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2312/1/012037>
- [39] A. F. Abbas and M. Z. Abdullah, "Design and Implementation of a Smart Home Gas Detection Based on Mobile Network System," *J. Eng. Sustain. Dev.*, vol. 25, no. 2, pp. 9–16, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31272/jeasd.25.2.2>
- [40] M. A. A. Bakar, M. R. Manan, R. M. Kawi, and L. J. Yunn, "System Design for Early Detection of Explosive and Flammable Gas Leaks Using Mobile Robot in Confined Space," in *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2107, no. 1, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012028>